

АНАЛІЗ ПРУЖНО-ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ ДІЛЯНКИ МАГІСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДУ З УРАХУВАННЯМ ЗМІЦНЕННЯ МАТЕРІАЛУ

© Харченко Є.В., Кичма А.О., Савула Р.С., 2013

Розглянуто задачу визначення згинального моменту у поперечному перерізі труби з урахуванням пружно-пластичного деформування, а також зміцнення матеріалу. Значення моменту обчислюється за кривизною осі zdeформованої труби, а радіус кривизни – за результатами геодезичних вимірювань. Досліджено вплив межі текучості і зміцнення матеріалу на значення згинального моменту.

The problem of determining bending moment in cross-section of deformed tube of the gas pipeline, taking into account elastic-plastic deformation of the material. Pre-calculated radius of curvature of the axis of the pipeline on the results of geodetic measurements. Since the value required it is necessary for the repair of the pipeline by replacing the damaged area.

Вступ

Забезпечення експлуатаційної надійності газотранспортної системи України є надзвичайно важливим завданням, що має велике народногосподарське значення. Ця проблема охоплює не лише економічний аспект, пов'язаний з необхідністю безперебійного постачання газу, затратами на його транспортування та на обслуговування і ремонт газотранспортної системи, а й надзвичайно важливі аспекти, пов'язані з енергетичною і технічною безпекою держави, а також з екологічним станом довкілля.

З огляду на те, що значна частина магістральних газопроводів експлуатується більше як 40–50 років і великою мірою вичерпала свій ресурс, актуальним науково-технічним завданням є вдосконалення технології обслуговування і ремонту лінійної частини газотранспортної системи [5, 7, 9, 12]. Питанням діагностики технічного стану магістральних газопроводів, міцності оболонкових конструкцій, зварних швів та опорних вузлів у науковій літературі приділяється велика увага [1, 10, 11]. Досліджується вплив пластичних деформацій, зумовлених зсувом пластів або криволінійністю траси, на працездатність трубопроводів [3, 4]. Вивчається втрата стійкості трубопроводів у вигляді їх вигинання під дією осьових та згинних навантажень або сплющування [2]. Однак вплив пружно-пластичних деформацій труб на поведінку трубопроводу в процесі його капітального ремонту залишається маловивченим і потребує подальшого розгляду.

Під час проведення капітального ремонту газопроводу з викривленою віссю внаслідок вирізання пошкодженої ділянки труби випрямляються, що утруднює їх подальше з'єднання [6, 8]. Для того, щоб привести випрямлені труби у початковий стан, необхідно до країв цих труб прикласти навантаження у вигляді зовнішніх моментів за допомогою спеціальних центрвальних пристроїв. Згинальний момент може бути знайдений за кривизною осі zdeформованої труби, а радіус кривизни визначається, своєю чергою, за результатами геодезичних вимірювань. Задача визначення згинального моменту у поперечному перерізі труби з урахуванням пружно-пластичних деформацій матеріалу розглядається у цій роботі.

Визначення радіуса кривизни осі трубопроводу за результатами геодезичних вимірювань

Розглянемо ділянку трубопроводу (рис. 1), для крайніх точок якої визначений перепад висот h_1 і h_2 .

Введемо позначення:

$$A_1B_1 = s_1; \quad B_1C_1 = s_2. \quad (1)$$

Згідно з рис. 1 і позначеннями (1), радіус кривизни зігнутої осі трубопроводу буде:

$$\rho = \frac{s_1}{2 \sin \beta_1} = \frac{s_2}{2 \sin \beta_2}. \quad (2)$$

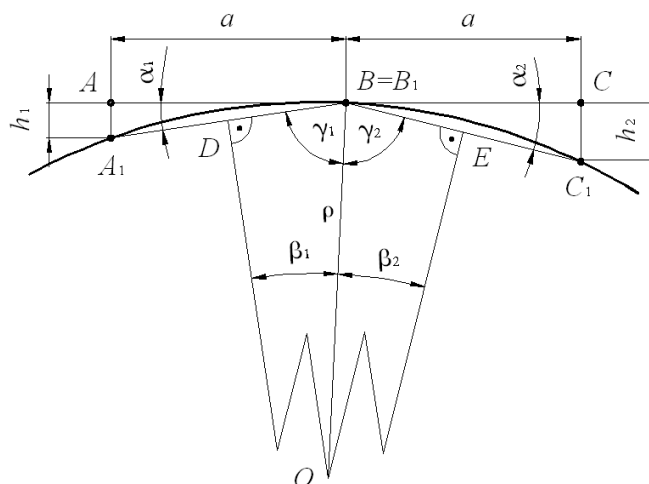


Рис. 1. Схема для визначення кривизни зігнутої осі трубопроводу

З аналізу трикутників AA_1B , CC_1B , ODB і OEB випливає:

$$\beta_1 + \beta_2 = \alpha_1 + \alpha_2, \quad (3)$$

оскільки

$$\alpha_1 + \alpha_2 = 180^\circ - \gamma_1 - \gamma_2; \quad \beta_1 + \beta_2 = 180^\circ - \gamma_1 - \gamma_2.$$

З рівняння (3) одержимо:

$$\beta_2 = \alpha_1 + \alpha_2 - \beta_1;$$

$$\sin \beta_2 = \sin(\alpha_1 + \alpha_2) \cos \beta_1 - \cos(\alpha_1 + \alpha_2) \sin \beta_1. \quad (4)$$

З урахуванням залежностей (2) і (4) запишемо:

$$s_1 [\sin(\alpha_1 + \alpha_2) \cos \beta_1 - \cos(\alpha_1 + \alpha_2) \sin \beta_1] = s_2 \sin \beta_1. \quad (5)$$

На основі розгляду трикутників AA_1B і CC_1B запишемо:

$$s_1 = \frac{a}{\cos \alpha_1}; \quad s_2 = \frac{a}{\cos \alpha_2}. \quad (6)$$

З урахуванням (5) і (6) знаходимо:

$$\operatorname{tg} \beta_1 = \frac{\sin(\alpha_1 + \alpha_2) \cdot \cos \alpha_2}{\cos(\alpha_1 + \alpha_2) \cdot \cos \alpha_2 + \cos \alpha_1}. \quad (7)$$

Із перших рівностей (2), (6) і співвідношення (7) визначаємо радіус кривизни зігнутої осі трубопроводу у вигляді

$$\rho = \frac{a}{2 \cos \alpha_1 \cdot \sin \left[\operatorname{arctg} \frac{\sin(\alpha_1 + \alpha_2) \cdot \cos \alpha_2}{\cos(\alpha_1 + \alpha_2) \cdot \cos \alpha_2 + \cos \alpha_1} \right]}, \quad (8)$$

причому

$$\alpha_1 = \operatorname{arctg} \frac{h_1}{a}; \quad \alpha_2 = \operatorname{arctg} \frac{h_2}{a}.$$

Залежність між згинальним моментом і кривизною осі труби в процесі пружно-пластичного деформування

Якщо припустити, що в процесі пружно-пластичного деформування труби виконується гіпотеза плоских перерізів, то відносна лінійна деформація шару волокон, розташованих на відстані y від нейтрального шару, буде

$$\varepsilon = \frac{y}{\rho}, \quad (9)$$

де ρ – радіус кривизни зігнутої осі труби (8).

Для цього випадку еюра відносних лінійних деформацій волокон зображена на рис. 2, *а*, еюра пластичних деформацій – на рис. 2, *б*, а еюра нормальних напружень для ідеально пластичного матеріалу, що підпорядковується діаграмі Прандтля, зображена на рис. 2, *в*.

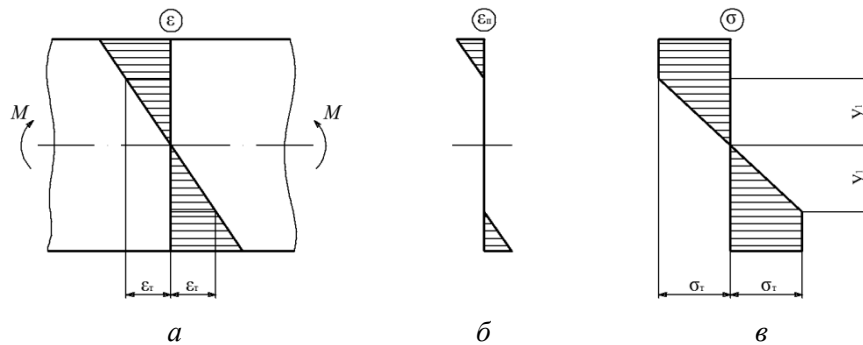


Рис. 2. Еюри сумарних відносних лінійних деформацій (*а*), відносних лінійних пластичних деформацій (*б*) і нормальних напружень в осьовому напрямку поперечного перерізу стрижня

На рисунку позначено: M – згинальний момент; ε_T – відносна лінійна деформація, що відповідає настанню текучості матеріалу; σ_T – межа текучості; y_1 – відстань від нейтрального шару до перехідного шару волокон, який розділяє зону пружного і пружно-пластичного деформування матеріалу труби.

Положення перехідного шару знаходять з умови, що у ньому відносна лінійна деформація волокон (9) дорівнює відносній лінійній деформації текучості матеріалу:

$$\frac{y_1}{\rho} = \varepsilon_T, \quad (10)$$

звідки

$$y_1 = \rho \varepsilon_T. \quad (11)$$

Згідно з діаграмою Прандтля, нормальне напруження у випадку пружно-пластичного згину визначається за такими співвідношеннями:

$$\begin{aligned} \sigma &= E\varepsilon, \text{ якщо } \varepsilon \leq \varepsilon_T; \\ \sigma &= \sigma_T, \text{ якщо } \varepsilon > \varepsilon_T. \end{aligned} \quad (12)$$

Поділивши з урахуванням (10) поперечний переріз труби на зону площею $2A_1$, що відповідає пружним, і зону площею $2A_2$, що відповідає пружно-пластичним деформаціям матеріалу, і взявши до уваги співвідношення (9)–(12), розглядатимемо нормальні напруження як функції координати y :

$$\begin{aligned} \sigma &= E \frac{y}{\rho}, \text{ якщо } y \leq y_1; \\ \sigma &= \sigma_T, \text{ якщо } y > y_1. \end{aligned} \quad (13)$$

Згинальний момент у поперечному перерізі труби запишемо з урахуванням (13):

$$M = \frac{2E}{\rho} \int_{A_1} y^2 dA + 2\sigma_T \int_{A_2} y dA. \quad (14)$$

У рівності (14) фігурують момент інерції і статичний момент половин відповідних частин поперечного перерізу труби (рис. 3):

$$I_{z1} = \int_{A_1} y^2 dA; \quad S_{z2} = \int_{A_2} y dA. \quad (15)$$

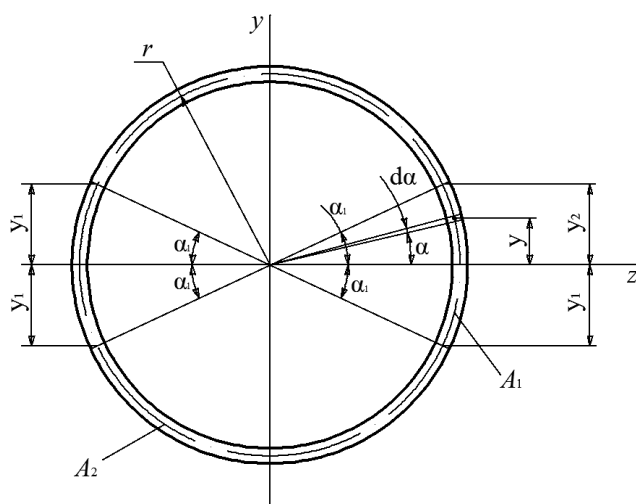


Рис. 3. Поділ поперечного перерізу труби на зони пружного і пружно-пластичного деформування

Виразивши елементарну площу поперечного перерізу dA та її координату y через кут α (рис. 3) та врахувавши межі інтегрування виразів (15), знаходимо

$$I_{z1} = 2r^3\delta \int_0^{\alpha_1} \sin^2 \alpha d\alpha = r^3\delta \left(\alpha_1 - \frac{1}{2} \sin 2\alpha_1 \right); \quad (16)$$

$$S_{z2} = 2r^2\delta \int_{\alpha_1}^{\frac{\pi}{2}} \sin \alpha d\alpha = 2r^2\delta \cos \alpha_1, \quad (17)$$

де r і δ – радіус серединної поверхні і товщина стінки труби.

З урахуванням (14), (16) і (17) одержимо:

$$M = \frac{1}{\rho} Er^3\delta(2\alpha_1 - \sin 2\alpha_1) + 4\sigma_T 2r^2\delta \cos \alpha_1. \quad (18)$$

Формула (18) дає можливість обчислити згинальний момент у поперечному перерізі труби з урахуванням пружних і пластичних деформацій за відомим радіусом кривизни осі труби.

Для знаходження кривизни осі труби за відомим згинальним моментом із залежності (18) одержимо співвідношення:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M - 4\sigma_T r^2\delta \cos \alpha_1}{Er^3\delta(2\alpha_1 - \sin 2\alpha_1)}.$$

Залежності згинального моменту у трубах з умовним діаметром 1220 мм та товщиною стінки 15,2 мм, виготовлених із матеріалів, що мають межі текучості 300, 350, 400, 450, 500 і 550 МПа, показані на рис. 4.

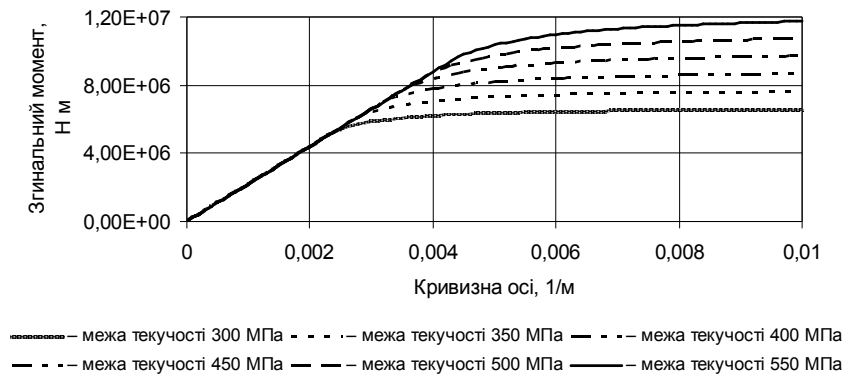


Рис. 4. Залежності згинального моменту в трубі від кривизни осі, одержані з урахуванням пружних і пластичних деформацій

Вплив зміцнення матеріалу у процесі пружно-пластичного деформування труби на значення згинального моменту

Для визначення впливу зміцнення матеріалу у процесі пружно-пластичного деформування труби на значення згинального моменту скористаємося схематизованою діаграмою розтягу, зображеною на рис. 5, де σ , ε – нормальне напруження та відносна лінійна деформація; σ_T , ε_T – напруження і деформація текучості; $\alpha = \arctg E$ та $\beta = \arctg b$ – кути нахилу ділянок діаграми в областях пружних і пружно-пластичних деформацій (E – модуль Юнга; b – константа апроксимації відповідної ділянки діаграми розтягу); $a = \sigma_T - \varepsilon_T b$.

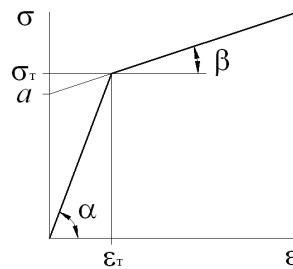


Рис. 5. Схематизована діаграма розтягу з урахуванням пружно-пластичного деформування та зміцнення матеріалу

Епюри відносних лінійних деформацій матеріалу і напружень у поперечних перерізах труби в умовах пружно-пластичного деформування зображені на рис. 6, де x , y – поздовжня і поперечна координати; M – згинальний момент; d – зовнішній діаметр труби; y_1 – відстань від осі стрижня до поверхонь, які розділяють тіло труби на зони пружного і пружно-пластичного деформування.

З урахуванням характеристик схематизованої діаграми розтягу і геометрії поперечного перерізу труби одержимо вираз згинального моменту:

$$M = \frac{2E}{\rho} I_{z1} + 2(\sigma_\delta - b\varepsilon_\delta) S_{z2} + \frac{2b}{\rho} I_{z2}, \quad (19)$$

де I_{z1} , S_{z2} , I_{z2} – момент інерції поперечного перерізу зони пружного деформування труби, а також статичний момент і момент інерції поперечного перерізу зони пружно-пластичного деформування стосовно головної центральної осі z , перпендикулярної до площини згину:

$$I_{z1}^2 = r^3 \delta \left(\alpha_1 - \frac{1}{2} \sin 2\alpha_1 \right), \quad S_{z2} = 2r^2 \delta \cos \alpha_1, \quad (20)$$

$$I_{z2}^2 = r^3 \delta \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_1 + \frac{1}{2} \sin 2\alpha_1 \right),$$

причому, r і δ – серединний радіус і товщина стінки труби; $\alpha_1 = \arcsin(y_1/r)$ – центральний кут поперечного перерізу труби, що охоплює половину зони пружного деформування.

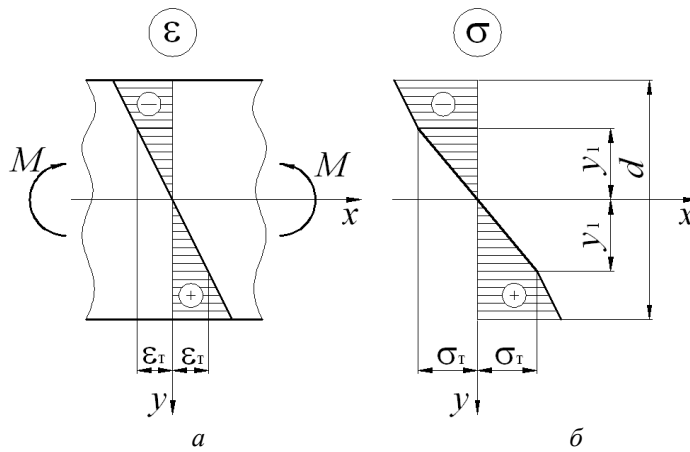


Рис. 6. Епюри сумарних відносних деформацій (а) і нормальних напружень (б) у поперечному перерізі труби

Як бачимо із залежностей, показаних на рис. 7, зростання напружень у матеріалі із збільшенням відносних лінійних деформацій за межею пружності істотно впливає на значення згинального моменту у поперечному перерізі труби, що необхідно враховувати під час проведення капітального ремонту магістрального трубопроводу. Криві на графіках відповідають значенням межі текучості матеріалу: 300, 350, 400, 450, 500, 550 МПа.

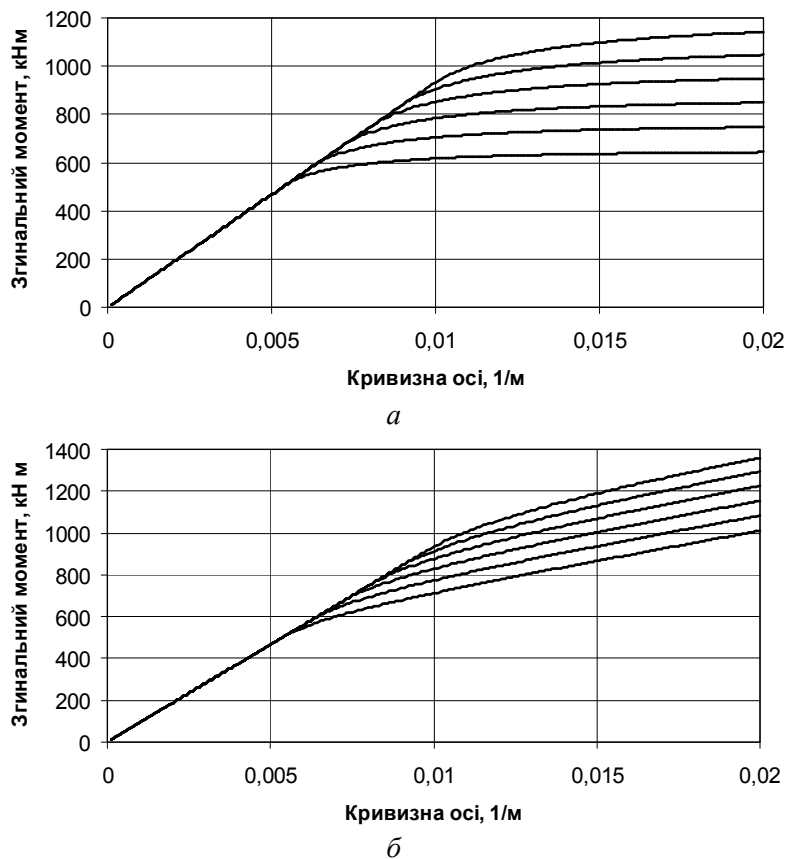


Рис. 7. Залежності згинального моменту у поперечному перерізі труби від кривизни її осі для ідеально пластичного матеріалу (а) та для матеріалу, що підпорядковується схематизованій діаграмі розтягу (б): $d = 530$ мм; $\delta = 8$ мм; $b=0,3E$

Розрахунки напружено-деформованого стану газопроводу показують, що згинальні моменти у його поперечних перерізах, викликані локальною взаємодією труби з опорою, можуть поширюватися на значну відстань, і це призводить до істотних зміщень стиків труби у процесі

капітального ремонту. Для центрування з'єднаних кінців трубопроводу доцільно одночасно застосовувати спеціальні притискні вантажі та стяжні пристрої, що дає можливість забезпечувати належну точність з'єднання і запобігає виникненню надмірних монтажних напружень у трубах.

Висновки:

1. На основі аналізу напружено-деформованого стану труби одержані формули (18) і (19), які дають можливість обчислити згинальний момент у поперечному перерізі труби з урахуванням пружних і пластичних деформацій за відомим радіусом кривизни осі труби. Як свідчать результати досліджень, за наявності пластичних деформацій матеріалу його межа текучості істотно впливає на значення згинального моменту, що необхідно враховувати під час проектування пристроїв для центрування з'єднаних кінців труб під час капітального ремонту газопроводу.

2. На основі застосування схематизованої діаграми розтягу розглянуто вплив зміцнення матеріалу в процесі пружно-пластичного деформування труби на значення згинального моменту. Показано, що зростання напружень у матеріалі із збільшенням відносних лінійних деформацій за межею пружності може зумовити збільшення згинального моменту у поперечному перерізі труби на 20–30 %.

3. Розрахунки напружено-деформованого стану газопроводу показують, що згинальні моменти у його поперечних перерізах, викликані локальною взаємодією труби з опорою, можуть поширюватися на значну відстань, що призводить до істотних зміщень стиків труби у процесі капітального ремонту. Для центрування з'єднаних кінців трубопроводу доцільно одночасно застосовувати спеціальні притискні вантажі та стяжні пристрої, що дає можливість забезпечувати належну точність з'єднання і запобігає виникненню надмірних монтажних напружень у трубах.

1. Бабин Л. А., Быков Л. И., Волохов В. Я. Типовые расчёты по сооружению трубопроводов. – М.: Недра, 1979. – 173 с. 2. Білобран Б. С. Решение при помощи ЭВМ задачи выпучивания трубопровода за пределом упругости // Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. – М.: ВНИИОЭНГ, 1992. – Вып. 2. – С. 5 – 10. 3. Білобран Б.С., Василюк В.М., Кінаш О.Б. Діагностика напруженого стану надземного переходу нафтопроводу в зоні зсуву // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів і конструкцій. – Львів: Каменяр, – 1998. – Вып. 3. – С. 580 – 584. 4. Білобран Б. С., Кінаш О. Б. Пружнопластичний стан тонкостінної труби під тиском при згині з розтягом (стиском) // Пробл. прочности. – 1998. – №6. – С. 99 – 105. 5. Бородавкин П.П., Березин В.Л. Сооружение магистральных трубопроводов. – М.: Недра, 1978. – 407 с. 6. Бородавкин П. П., Таран В. Я. Трубопроводы в сложных условиях. – М.: Недра, 1968. – 346 с. 7. Грудз В. Я., Тимків Д. Ф., Михалків В. Б., Костів В. В. Обслуговування і ремонт газопроводів. – Івано-Франківськ: Лілея-НВ, 2009. – 712 с. 8. Грудз В. Я., Тымкив Д. Ф., Мельницкий И. О. Анализ надёжности и живучести газотранспортных систем в горных условиях // Тез. докл. на Всесоюз. науч.-техн. конф. “Проблемы трубопроводного транспорта нефти и газа”. – Ивано-Франковск, 1965. – С. 158. 9. Довідник з нафтогазової справи / за заг. ред. В. С. Бойка, Р. М. Кондрата, Р. С. Яремійчука. – Львів: Івано-Франківський державний технічний університет нафти і газу, 1966. – 620 с. 10. Комерштейн А. Г., Рождественский В. В., Ручимский М. Н. Расчёт трубопроводов на прочность: справоч. книга. – М.: Недра, 1978. – 355 с. 11. Красовский А. Я., Краси́ко В. Н. Трещиностойкость сталей магистральных трубопроводов. – К.: Наук. думка, 1990. – 176 с. 12. Трубопроводний транспорт газу / М. П. Ковалко, В. Я. Грудз, В. Б. Михалків та ін. – К.: Арена ЕКО, 2002. – 600 с.